

文章编号: 1001-6791(2001)04-0460-07

农田土壤水分和盐分的空间变异性 及其协同克里格估值^{*}

胡克林¹, 李保国¹, 陈德立², R. E. White²

(1. 中国农业大学土壤和水科学系, 北京 100094;

2. 澳大利亚墨尔本大学土地和食品学院, 维多利亚 3052 澳大利亚)

摘要: 通过对一块面积为 1hm² 麦田内的 98 个观测点取样分析, 测定了两个时期的土壤水分和盐分含量。结果表明两个时期的土壤含水量均服从正态分布, 底层盐分均服从对数正态分布, 而表层的盐分分布具有不确定性。两个时期土壤水分和盐分的变异系数分别属于弱变异和中等变异强度。通过结构分析, 发现两个时期的水分和盐分均在一定范围内存在空间相关性。对两个时期土壤水分和盐分空间分布的动态变化进行了比较, 同时采用 CoKriging 方法进行估值, 与 Kriging 法相比, 其估计方差减少百分数最大达到了 136.3%。

关 键 词: 土壤水分; 土壤盐分; 空间变异; 半方差函数; 协同克里格法

中图分类号: S 152.7 **文献标识码:** A

20 世纪 70 年代以来, 土壤特性的空间变异或其它农田特征变异定量化研究一直是关注的一个热点^[1], 已有的研究涉及到了众多土壤物理与化学性质, 但这些研究大多集中在某一时刻土壤特性的空间变异分析上。

对于土壤水盐运动规律的研究, 大多采用确定性模型来进行预测预报^[2], 由于空间变异的作用, 在时间上其结构特征是否稳定或如何变化, 对于水盐运动的监测和预报都是至关重要的。土壤某一性质的空间分布经常会与其它性质密切相关, 因为它们受同样的区域化现象或空间过程的影响, 这种性质就称为协同区域化性质。因而可以利用两个变量或一个变量在两个时段之间的相关性, 用其中易得到的变量对另一个变量进行局部估值^[3~5]。

本文应用的统计学方法对两个时期土壤水分和盐分的空间变异性进行了研究, 绘制了等值线图, 并对两个时期土壤水分和盐分空间分布的动态变化进行了分析, 同时应用了协同克里格法来进行估值, 对两种方法的估值精度进行了比较。此研究对于区域尺度下水盐运动特征的监测和采用 CoKriging 方法来研究协同区域化现象的土壤属性都具有一定的借鉴意义和参考作用。

^{*} 收稿日期: 2000-08-21; 修订日期: 2000-10-31

基金项目: 中澳合作 ACIAR 项目 (LWR1/96/164); 国家“九五”科技攻关项目 (96-004-01-14-2)。

作者简介: 胡克林 (1971 -), 男, 湖北钟祥人, 中国农业大学讲师, 博士, 主要从事水土资源空间变异与溶质运移模型相结合的研究。

1 材料和方法

1.1 研究方法

试验地点设在河北省曲周县中国农业大学曲周实验站东。面积约 1 hm²、土壤为粉砂质潮土的田块上，20 世纪 80 年代初为轻-中度盐化潮土，地下水埋深 3.5 m 左右。该地小麦-玉米一年两作，当季种植小麦。将其划分成若干个 10 m ×10 m 的网格，共设置了 98 个取样点。分别于表层(0~20 cm)和底层(80~100 cm)两个层次上取样。采样时间分别是 1998 年 3 月 18 日(田间较干，表层平均质量含水量为 17.9 %)和 1998 年 5 月 12 日(田间较湿，表层平均质量含水量为 21.0 %)。

1.2 测定项目及方法

质量含水量：烘干法，在 105~110 °C下烘 6~8h。

土壤电导率：水土比为 5 ∶ 1，使用 DDS-11A_T 电导率仪测定，已有此地区的研究工作表明，土壤总盐分含量与水土比为 5 ∶ 1 的浸提液电导率值有显著的相关性^[6]。

2 结果分析

2.1 水分和盐分的统计特征值

根据田间实测样本的统计分析和 χ^2 检验及正态累积概率曲线分析，得到表 1 的结果。

表 1 土壤水分和盐分的统计特征值

Table.1 Statistical feature values of soil water and salt content

采样日期	土壤属性	分布类型	均值	标准差	最小值	最大值	变异系数	取样数目 (P _L = 95 %)
3 月 18 日	表层含水量	正 态	17.9	1.08	15.34	20.69	0.06	1
	底层含水量	正 态	26.67	1.94	20.66	30.84	0.07	2
	表层电导率	对数正态	0.25	0.089	0.10	0.80	0.30	35
	底层电导率	对数正态	0.38	0.14	0.16	0.82	0.36	51
5 月 12 日	表层含水量	正 态	21.0	0.83	19.21	24.05	0.04	1
	底层含水量	正 态	24.74	2.85	15.87	30.96	0.12	5
	表层电导率	偏 态	0.16	0.05	0.069	1.00	0.31	38
	底层电导率	对数正态	0.31	0.11	0.10	0.99	0.36	51

注：表中质量含水量的单位为 %，电导率的单位为 mS·cm⁻¹。

从分布类型来看(表 1)，两个时期的表层和底层的质量含水量均服从正态分布，而盐分的分布类型较为复杂，两个时期的底层电导率均服从对数正态分布，表层的电导率在 5 月 12 日时属偏态分布，在 3 月 18 日时服从对数正态分布。

从变异系数来看，两个时期土壤水分的变异系数均较小，在 0.04~0.12 范围内，属于弱变异强度，电导率的变异系数在 0.3 左右，属于中等变异强度^[7]。

从变幅来看，3 月 18 日和 5 月 12 日，土壤表层质量含水量的最大值与最小值相差约 5 % 左右；但对于土壤底层质量含水量来说，它们的变化较大，在 3 月 18 日，平均值为 26.7 %，其最大值与最小值相差 10 % 左右，而 5 月 12 日的差别更大，最大值为 31.0 %，最小值仅为 15.9 %，其最大值约是最小值的 2 倍。5 月 12 日土壤表层和底层电导率的均值都略小于 3 月 18

日。这反映了在此时期该地水盐运动的总体特征。但电导率大小表明，土壤总盐分含量在很低的水平上为非盐渍化土壤。3 月 18 日表层电导率高，是表层养分含量较高所致（在 3 月 12 日有一次追肥）。

在置信水平 $P_L = 95\%$ ，且精度为均值的 10% 的情况下，土壤表层和底层含水量的合理取样数目分别为 1 个和 2~5 个；土壤表层和底层盐分的合理取样数目分别为 35~38 个和 51 个^[7]。

2.2 半方差函数的结构分析

半方差函数的理论模型及参数的确定可参考有关文献^[8,9]，结果如表 2 所示。

表 2 土壤水分和电导率的半方差函数模型类型及其参数值

Table 2 Type of semi-variance model for soil water and EC and their parameter values

采样日期	土壤属性	理论模型	C_0	$C_0 + C_1$	$C_0 / (C_0 + C_1)$	a/m	离差平方和
3 月 18 日	表层含水量	指数	0.532	1.375	0.387	26.07	0.03
	底层含水量	球状	2.66	4.68	0.568	87.08	0.291
	表层电导率	球状	0.114	0.178	0.640	37.26	0.00004
	底层电导率	球状	0.049	0.113	0.434	26.78	0.0004
5 月 12 日	表层含水量	高斯	0.495	0.816	0.607	40.07	0.00043
	底层含水量	球状	4.69	9.38	0.500	61.18	0.314
	表层电导率	球状	0.179	0.329	0.543	22.19	0.0703
	底层电导率	球状	0.034	0.168	0.199	18.94	0.00287

表 2 中， C_0 表示块金效应； $C_1 + C_0$ 表示基台值； a 表示变程，也称自相关距， $C_0 / (C_0 + C_1)$ 表示空间异质性程度^[10]，如果该比值较高，说明由随机部分引起的空间异质性程度较大；相反，则由空间自相关部分引起的空间异质性程度较大；如果该比值接近 1，则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。

从表 2 可以看出，除两个时期底层电导率和 3 月 18 日表层水分均是由空间自相关部分引起的空间异质性大于由随机因素引起的空间异质性外，其余土壤水分和电导率均是由随机因素引起的空间异质性大。

从相关距离来看，两个时期表层和底层质量含水量的自相关范围分别为 26~40 m 和 61~87 m；两个时期的土壤底层含水量的自相关距都要大于表层的自相关距，说明表层的含水量受到外界的影响因子较多，如气象因子，作物因子及人为活动因子，导致了其自相关范围较小，而底层只是间接地受到上述因子的作用。

两个时期盐分的自相关距表现出表层大于底层的现象，这可能与所研究的农田以前是盐碱地，地下水矿化度较高，底层盐分受到一定程度的地下水的影响有关。而且 5 月 12 日盐分的自相关距均比 3 月 18 日的小，原因为 3~5 月份期间，小麦生长旺盛，对养分的吸收较多，另外 5 月 9 日的降雨对表层盐分也有一定程度的淋洗作用，故导致了表层盐分自相关距的降低；而且该时段蒸发量大于降雨量，盐分向表层积聚，故导致了底层盐分自相关距的降低。

2.3 运用 Kriging 最优内插法进行估值

为了更直观地反映整个田块的土壤水分和盐分的空间分布情况，根据所得到的半方差函数模型，利用 Kriging 最优内插法，绘制了土壤含水量分布等值线图（图 1、2）。

从表层含水量等值线图（图 1a, 2a）来看，两个时期表层含水量的变幅均比较小，在土壤表层较干时，其表层含水量的差别比土壤较湿时的差别略大，这是因为在 5 月 9 日降雨后，导致

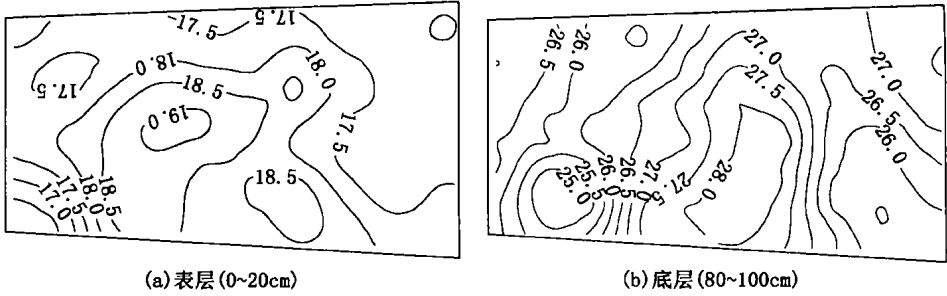


图 1 土壤含水量 (%) 分布等值线图 (3 月 18 日)

Fig. 1. Contour map of soil water content (%) in Mar. 18, 1998

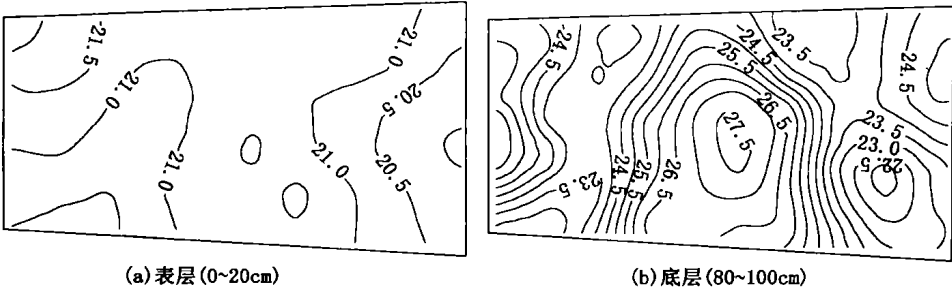


图 2 土壤含水量 (%) 分布等值线图 (5 月 12 日)

Fig. 2. Contour map of soil water content (%) in May 12, 1998

了整个田块表层土壤水分含量的差别减少。

从底层含水量分布等值线图(图 1b, 2b)可以看出, 两个时期的底层含水量分布的规律一致, 都是在田块东西两端的含水量较低, 而中间部分的含水量较高。只是 5 月 12 日的底层含水量比 3 月 18 日的含水量略有降低, 这是由于 3~5 月份期间, 土面蒸发量大于降雨量, 小麦的蒸腾作用逐渐增强, 底层水分不断向表层补充, 导致了底层土壤含水量的下降。

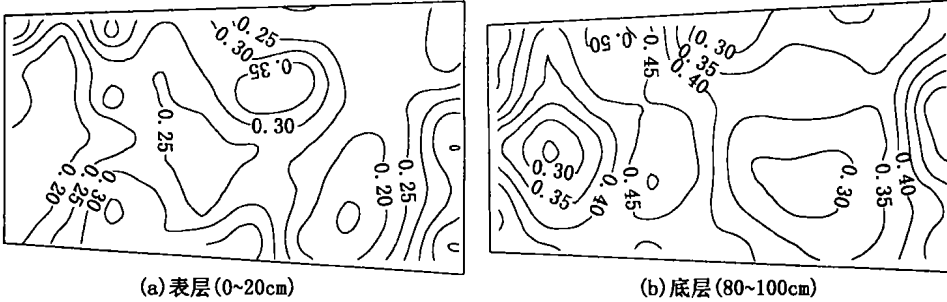


图 3 土壤电导率 ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) 分布等值线图 (3 月 18 日)

Fig. 3. Contour map of soil EC ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) in Mar. 18, 1998

从表层电导率的等值线图(图 3a, 4a)可以看出, 两个时期表层电导率值高的地方都是在田块的中间偏北和偏向西北角的地方。5 月 12 日的电导率值明显地低于 3 月 18 日的电导率值, 主要是 3~5 月份期间, 小麦生长旺盛, 对养分的吸收较多, 另外 5 月 9 日的降雨对表层盐分也有一定程度的淋洗作用。

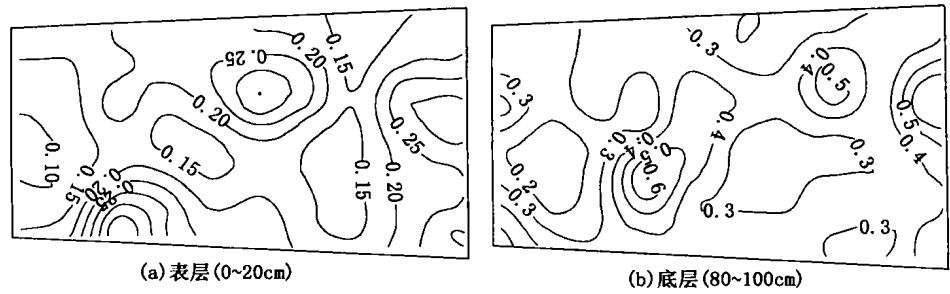


图 4 土壤电导率 ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) 分布等值线图 (5 月 12 日)

Fig. 4. Contour map of soil EC ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$) in May. 12, 1998

从底层电导率的等值线图(图 3b,4b)可以看出, 3 月 18 日底层电导率值高的地方主要集中在田块中间和正东边的部位, 而 5 月 12 日除了上述两个地方电导率值较高以外, 在田块东北角的地方也比较高, 两个时期底层电导率值的差别不大。

2. 4 运用 Co Kriging 最优内插法进行估值

任意选取土壤表层水分对表层盐分、表层水分对底层盐分及表层盐分对底层盐分进行了协同克立格估值。表 3 列举了三组协同区域化变量的交互半方差函数的模型及其参数值。

表 3 土壤属性交互半方差函数理论模型及其参数值

Table. 3 Types of semi-variance model for soil properties and their parameter values

土壤属性	取样日期	模型类型	C_0	C_1	a/m	离差平方和
表层水分和表层盐分	3 月 18 日	球状	0.0629	0.0661	66.70	0.00204
表层水分和底层盐分	5 月 12 日	高斯	- 0.0238	- 0.0637	76.79	0.00012
表层盐分和底层盐分	5 月 12 日	线性	0.032	0.0362	48.26	0.00047

从表 3 可以看出, 协同区域化变量可以是正相关, 也可以是负相关。这与协同区域化现象发生的具体过程有关。通过所得到的半方差函数模型及交互半方差函数模型, 利用协同克立格法进行最优插值, 得到了待估值变量及估计方差分布图。以下仅仅列举了 3 月 18 日普通克立格法和协同克立格法的估计方差分布图 (图 5)。

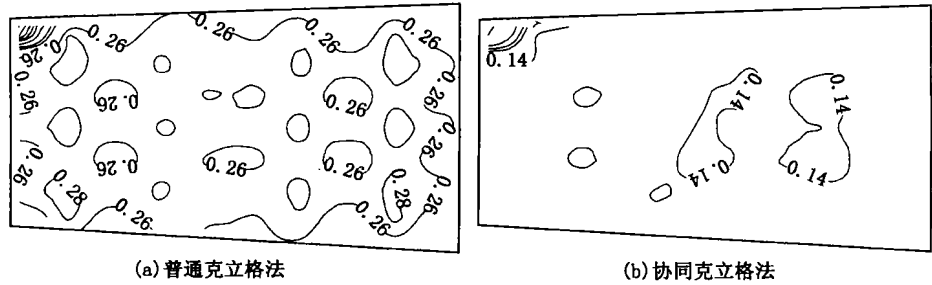


图 5 土壤表层电导率估计方差分布图 (3 月 18 日)

Fig. 5. Estimated variance map of surface soil salt content in Mar. 18, 1998

从图 5 可看出, 在田块的四条边界的地方估计方差都要略大于其它地方, 这是因为在田块四边布置的观测点较稀有关, 用周围的点对它进行估值时, 由于样点数较少, 故估计方差较大。另外普通克立格法的估计方差要明显大于协同克立格法的估计方差。

为了更加准确地比较普通克里格法与协同克里格法的估值精度，分别计算了对 100 个点进行估值时的普通克里格法估计方差和协同克里格法估计方差的总和，结果见表 4。

表 4 土壤属性的普通克里格法与协同克里格法估计方差的比较

Table 4. Comparison of estimated variances soil properties by the OK method and the COK method

土壤属性	取样日期	估值点数	σ_{ok}^2	σ_{cok}^2	δ
表层水分和表层盐分	3 月 18 日	100	26.32	14.06	87.16 %
表层水分和底层盐分	5 月 12 日	100	14.61	6.18	136.3 %
表层盐分和底层盐分	5 月 12 日	100	14.61	6.22	135.0 %

注： σ_{ok}^2 为普通克里格法总的估计方差； σ_{cok}^2 为协同克里格法总的估计方差； $\delta = (\sigma_{ok}^2 - \sigma_{cok}^2) / \sigma_{ok}^2$ 为方差减少的百分数。

从表 4 可以看出，三组协同区域化变量的协同克里格法估计方差都比普通克里格法估计方差要小，其中估计方差减少百分数最大的是 5 月 12 日的表层水分和盐分对底层盐分的估计方差，分别达到了 136.3 %，135.0 %。

通过对以上几个例子的具体分析说明了用较易测定的或测定费用较低的土壤属性对较难测定的或测定费用较高的土壤属性进行协同克里格估值，不仅能够获得较好的估值，而且能够大大提高估值的精度。

3 结 论

(1) 通过对两个时期冬小麦地表层和底层水分和盐分的统计分析结果表明，两个时期的表层和底层的质量含水量均服从正态分布，两个时期的底层盐分均服从对数正态分布，而表层的盐分分布具有不确定性。两个时期土壤水分的变异系数均较小，在 0.04~0.12 范围内，属于弱变异强度，盐分的变异系数在 0.3 左右，属于中等变异强度。

(2) 通过对水分和盐分的结构分析发现，两个时期的土壤底层含水量的自相关距都要大于表层的自相关距，主要原因在于表层的含水量受到外界的影响因子较多。盐分的自相关距表现出表层大于底层的现象。

(3) 通过对两个时期土壤水分和盐分空间分布的动态变化进行分析，发现在土壤表层较干时，其表层含水量的差别比土壤较湿时的差别略大，两个时期的底层含水量差别不大，而且分布的规律也一致，都是在田块的东西两端的含水量较低，而中间部分的含水量较高。由于作物吸收和降雨淋洗作用，5 月 12 日土壤表层电导率值明显地低于 3 月 18 日的电导率值，而底层电导率值差别不大。

(4) 任意选取土壤表层水分对表层盐分、表层水分对底层盐分及表层盐分对底层盐分分别进行了协同克里格估值，并将它们的估计方差与普通克里格法的估计方差进行对比，结果表明协同克里格法能够大大地提高估值精度，估计方差减少百分数最大能达到 136.3 %。因此，在农田土壤属性空间估值时，协同克里格法是一种值得推荐和应用的方法。

参考文献：

[1] Hillel D. Research in soil physics: a re - view[J]. Soil Sci, 1991, 151:30 - 34.
[2] 石元春, 李保国, 等. 区域水盐运动监测预报[M]. 石家庄:河北科学技术出版社, 1991.
[3] Vauclin M, Viera S R, et al. The use of cokriging with limited field soil observations[J], Soil Sci Soc Am J, 1983, 47:

175 - 184.

- [4] Vaughan P I, Esch S R, *et al.* Water content effect on soil salinity prediction :A geostatistical study using cokriging[J], Soil Sci Soc Am J. 1995, 59:1 146 - 1 156.
- [5] Zhang R D, Warrick A W, Myers D E. Improvement of prediction of soil particle size fractions using spectral properties [J]. Geoderma, 1992, 52 :223 - 234.
- [6] 石元春, 陆锦文, 李韵珠. 盐渍土的水盐运动[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1984.
- [7] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
- [8] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报. 1999, 15(3) :33 - 38.
- [9] 侯景儒, 尹镇南, 李维明, 等. 实用地质统计学[M]. 北京:地质出版社. 1998, 31 - 72.
- [10] Robertson G P, *et al.* Soil resources, microbial activity, and primary production across an agricultural ecosystem[J]. Ecological Applications, 1997, 7:158 - 170.

Spatial Variability of Soil Water and Salt in Field and their Estimations by the CoKriging^{*}

HU Ke-lin¹, LI Bao-guo¹, CHEN De-li², R. E. White²

(1. Department of Soil and Water Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Institute of Land and Food Resources, Melbourne University, Parkville Victoria 3052 Australia)

Abstract : The soils at ninety-eight observing points by a square of 10×10 (m^2) were sampled in a wheat field (approximately 1 ha). The soil water and salt of each point in the layers of 0 - 20cm and 80 - 100cm were measured at different time. The results indicated that the soil water content under two layers at different time showed a normal distribution, the soil salt content in bottom soil showed a lognormal distribution and the soil salt content in surface soil showed an uncertain distribution. The variability coefficients of soil water and salt respectively belonged to the low and middle intensity. The semivariance analysis was used and found that the soil water and salt were correlated in a given spatial range. Preliminary analysis was made for the spatial dynamic variability of soil water and salt in different time. The CoKriging method was also used to estimate soil water and salt content, the estimated variance could be decreased by 136.3 % comparing with ordinary Kriging.

Key words : soil water; soil salt; spatial variability; semivariance; CoKriging

^{*} The project is a Key Research Programme in the Five-Year Plan in China (96-004-01-14-1) and Sino-Australia Cooperative Research ACIAR Project (LWRI/ 96/ 164).